

## Energieeffizienz der elektrischen Antriebssysteme

pro Wirtschaft GT GmbH

*Future.Factory.Friday*: Energieeffiziente Antriebs- und Pumpentechnik

Prof. Dr.-Ing. Andreas Bünte

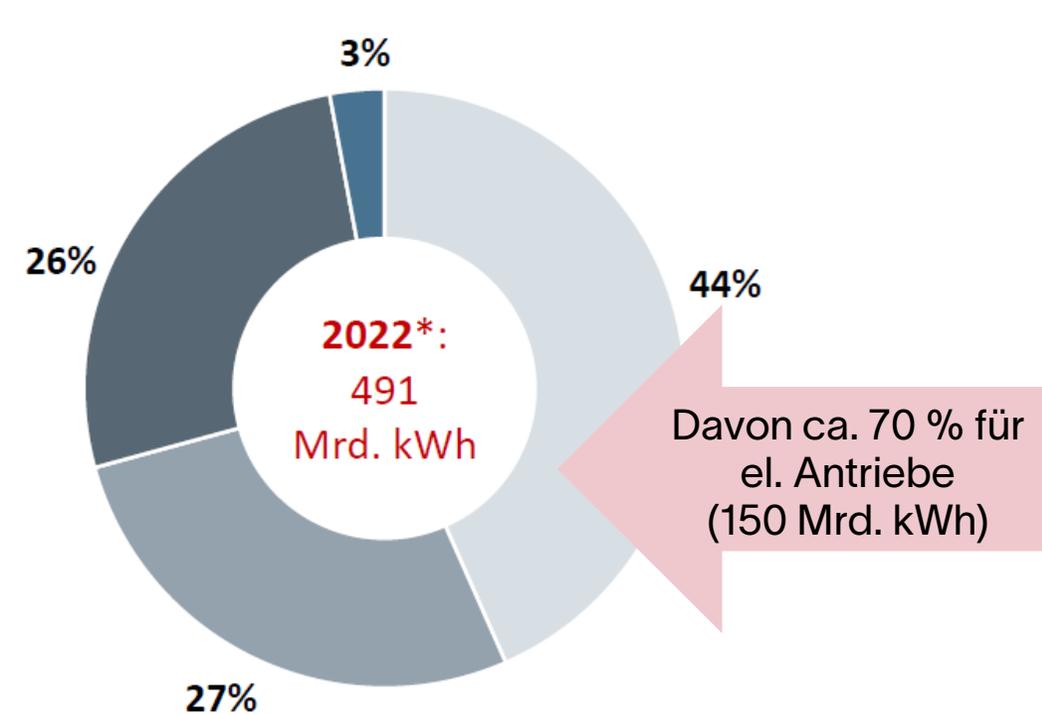
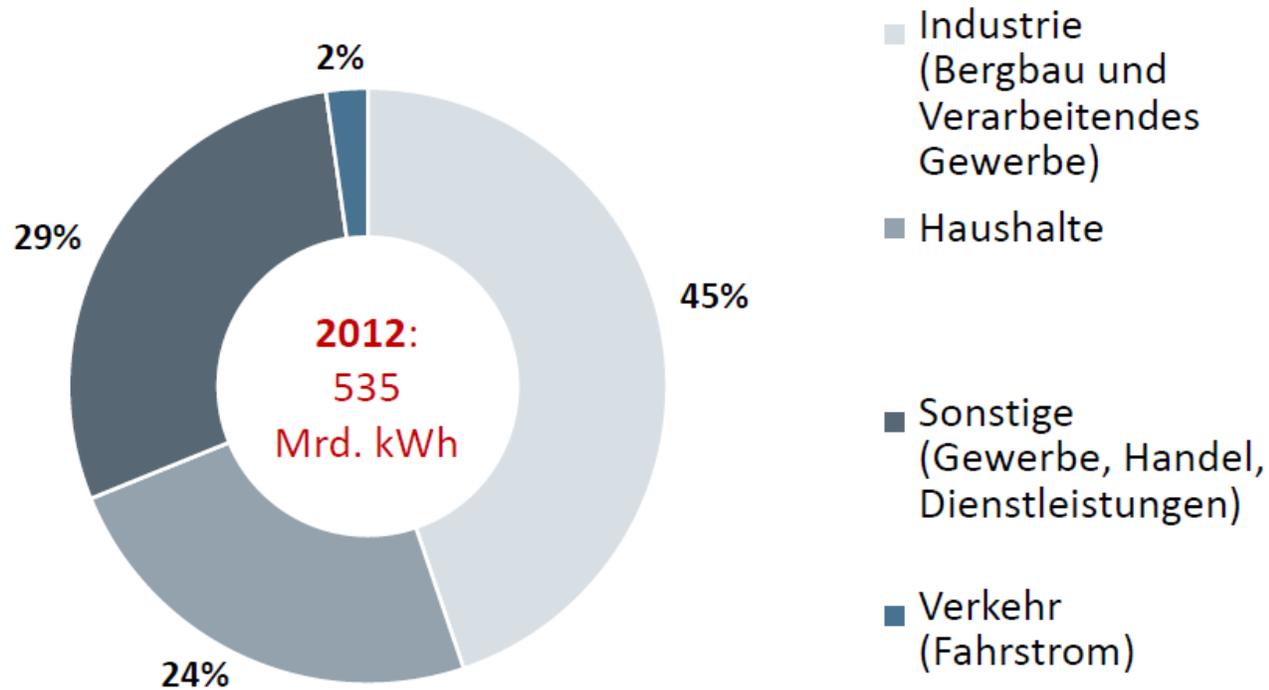
[andreas.buente@hsbi.de](mailto:andreas.buente@hsbi.de)

16.06.2023

# Inhalt

1. Einführung und Grundlagen
2. Asynchronmotoren
3. Energieeffizienzklassen
4. Frequenzumrichter
5. Getriebe
6. Generatorischer Betrieb, Bremsbetrieb

# Stromverbrauch in Deutschland



Quelle: BDEW; Stand 04/2023

\* vorläufig

# Ist Energieeinsparung so einfach?



## Effizienz-Unterschied neuer und alter Elektromotor

LEISTUNGS-AUFNAHME BEI	NEUE MOTORARTEN	ALTE MOTOREN
Volllast	100%	140% Strom
Halbe Drehzahl	50% Strom	80-90% Strom
Leerlauf	5% Strom	25% Strom

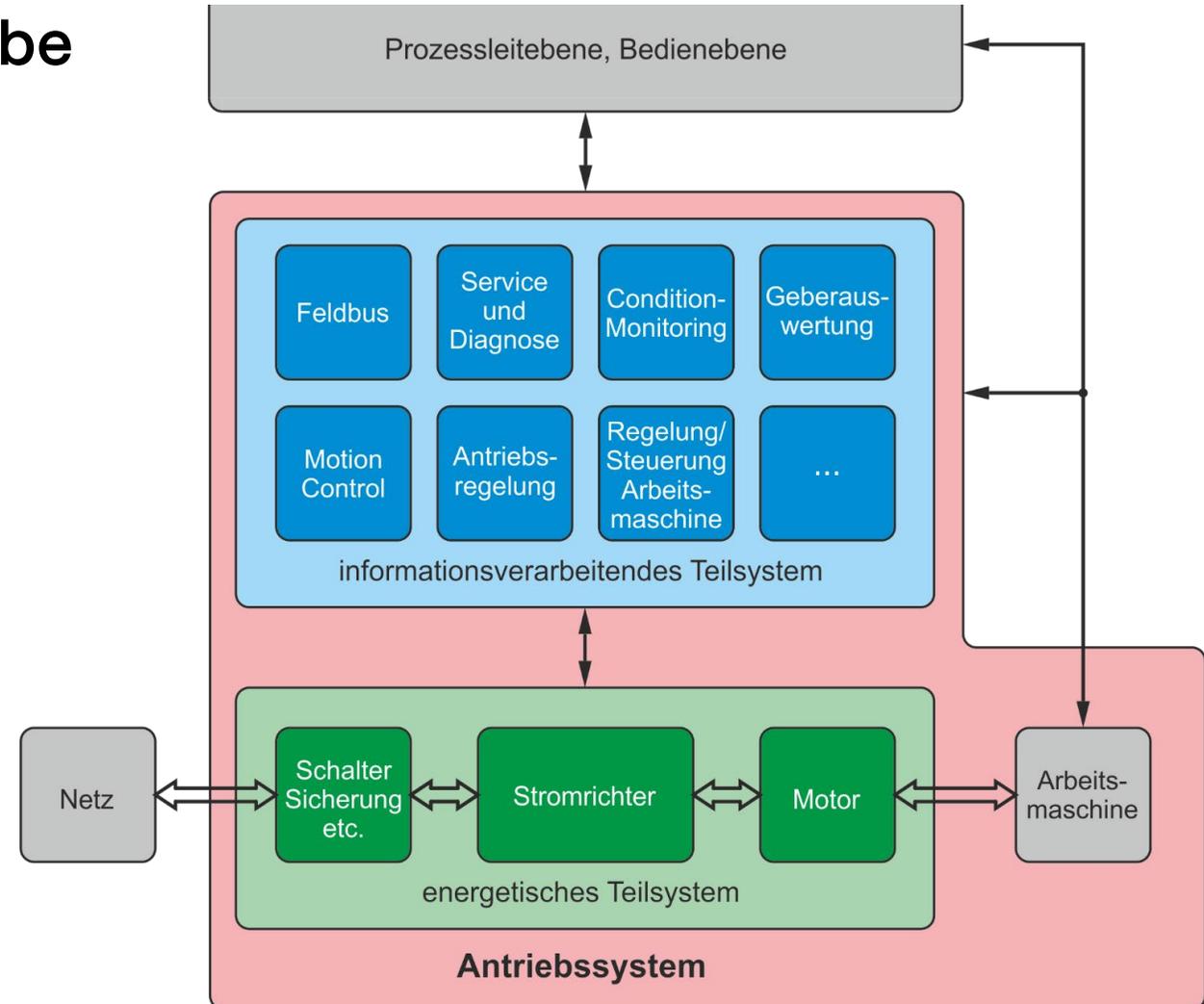
Hinweis: Bei Pumpen und Ventilatoren ist der Unterschied „Alt/Neu“ noch um einiges größer.

Quelle: <https://www.energieeffizienz-im-betrieb.net/energiesparen-unternehmen/energiekosten-pumpen-motoren.html>



# Aufgaben der elektrischen Antriebe

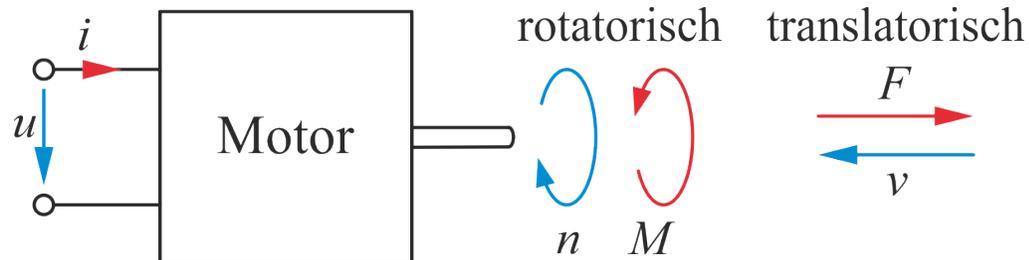
- Elektromechanische Energiewandlung  
*(Das ist heute der Schwerpunkt)*
- Umsetzung der vorgegebenen Bewegungsabläufe  
*(Dadurch werden die Randbedingungen sehr vielfältig)*



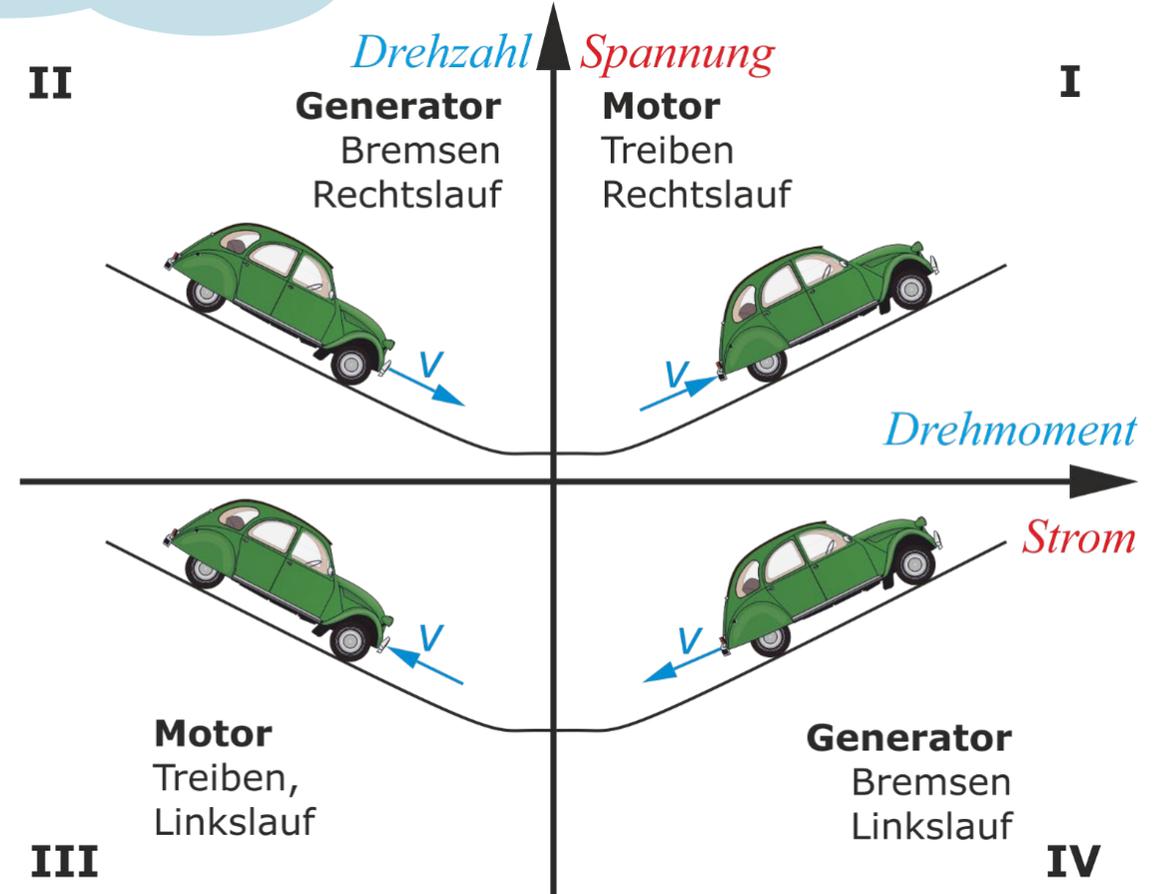
# Mechanische Größen vs. elektrische Größen

Etwas vereinfacht:

- I Drehmoment und Strom sind proportional.  
*Die Kupferverluste steigen mit dem Quadrat des Stroms.*
- II Drehzahl und Spannung sind proportional.  
*Die Eisenverluste steigen mit der Drehzahl.*
- III Der Motor kann auch als Generator betrieben werden.



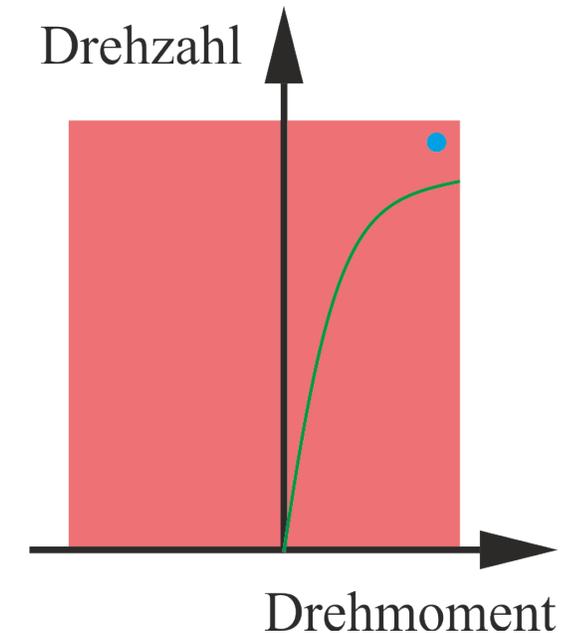
**Problem**  
Bei Netzbetrieb arbeiten typische Motoren mit einer festen Drehzahl



## Typische Betriebsarten

1. **Fester Arbeitspunkt (konstante Drehzahl, konstantes Drehmoment)**
  - Eignet sich für Netzbetrieb  $\Rightarrow$  Asynchronmotoren
  - Beispiel: Pumpe mit konstanter Förderhöhe und -volumen
2. **Drehzahlvariabler Betrieb (VSD, Variable Speed Drive)**
  - Einsatz von Frequenzumrichtern  
 $\Rightarrow$  Asynchron- oder Synchronmotoren
  - Beispiel: Pumpe/Gebälse mit variablem Fördervolumen [6]
3. **Drehzahlvariabler Betrieb mit regelmäßigem Bremsbetrieb**
  - Einsatz von Frequenzumrichtern  
 $\Rightarrow$  Asynchron- oder Synchronmotoren
  - Beispiele: Verpackungsmaschinen, Hubanwendungen, Aufzüge

Historisch werden in der Industrie oft Asynchronmotoren im Netzbetrieb (konstante Drehzahl) eingesetzt, da Leistungselektronik nicht verfügbar war.



# Leistung, Arbeit und Wirkungsgrad

Leistung

$$P_{el} \sim U \cdot I$$

$$P_m = 2\pi \cdot n \cdot M$$

$$P_{el} = P_m + P_{Verlust}$$

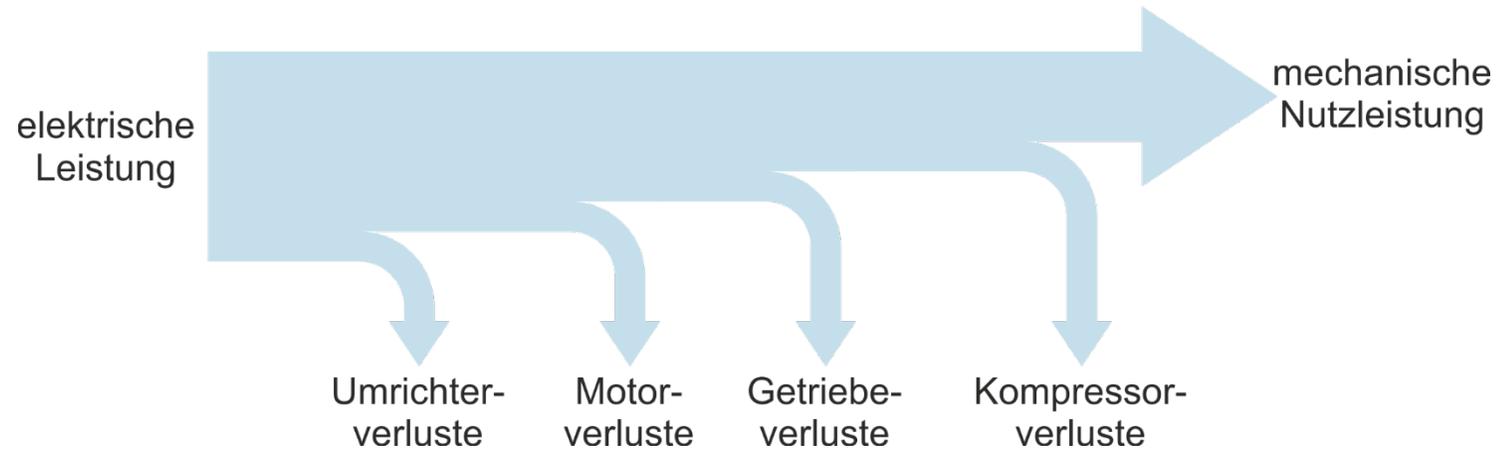
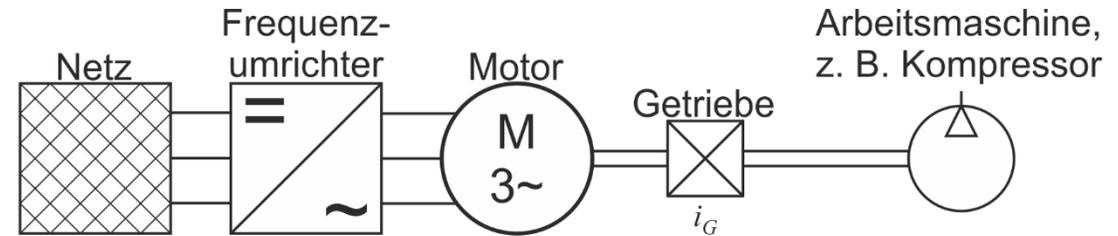
Energie

$$E_{el} = P_{el} \cdot \Delta t$$

Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_{Nutz}}{P_{ges}} = \frac{P_{Nutz}}{P_{Nutz} + P_{Verlust}}$$

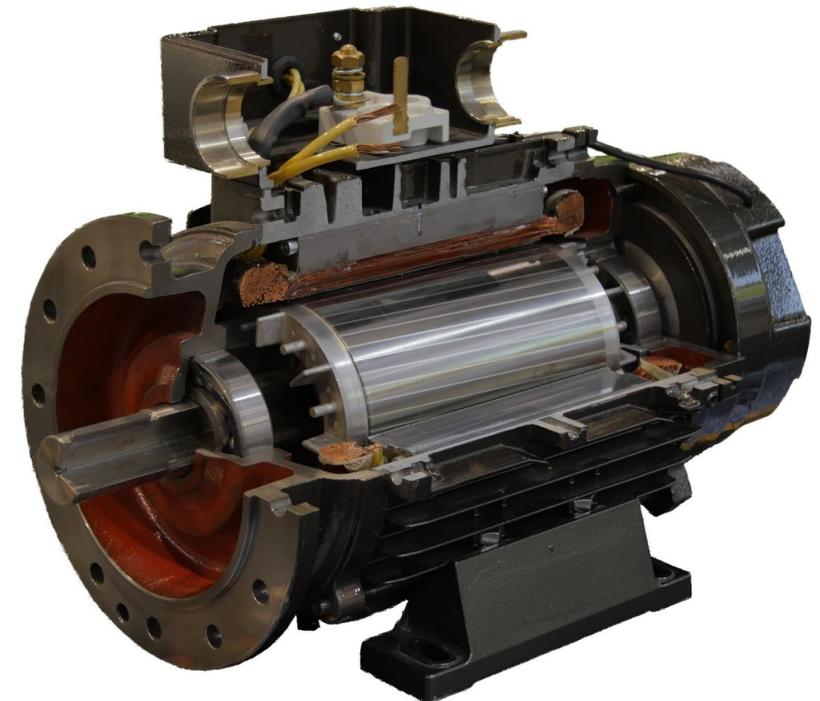
$$\eta_{ges} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n$$



## Eigenschaften von Asynchronmotoren (etwas vereinfacht)

- | Asynchronmotoren können am Netz anlaufen.
- | Drehzahlen am Netz näherungsweise konstant (polzahlabhängig)
- | Veränderliche Drehzahlen mit Frequenzumrichter
- | Zusätzlicher Strombedarf für Magnetisierung
- | Wesentliche Verlustquellen:
  - | Kupferverluste  
hängen von Drehmoment und Netzspannung ab
  - | Eisenverluste  
hängen von Drehzahl und Netzspannung ab
  - | mechanische Verluste  
entstehen durch Lager- und Luftreibung

**Im Teillastfall leidet der Wirkungsgrad.**



## Folgen einer Überdimensionierung

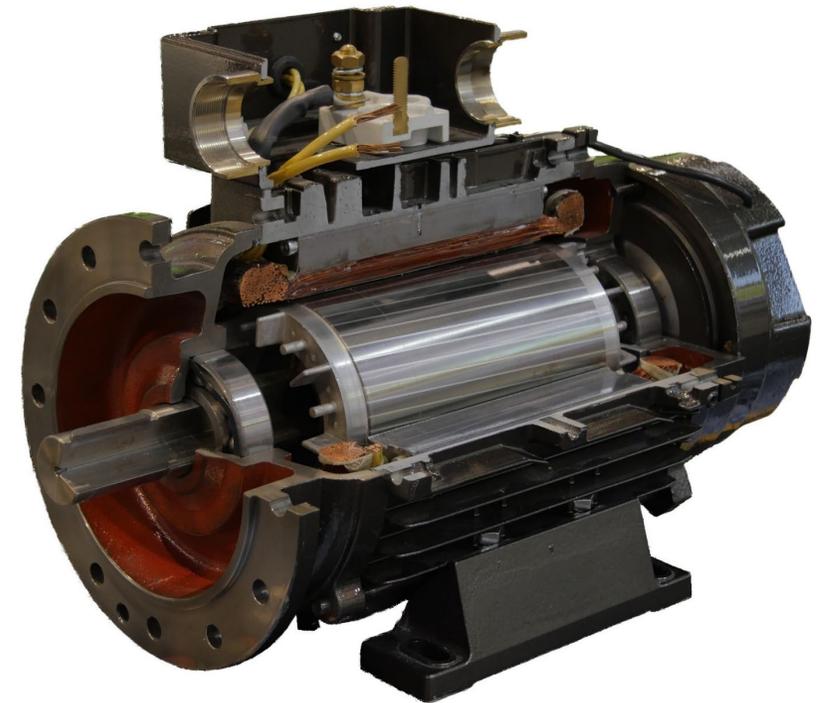
- Im Teillastbetrieb leidet der Wirkungsgrad.
- Für den Teillastfall kann er nach DIN EN 61800-9-1 bestimmt werden.

### Drehmomentüberdimensionierung

- Angaben in (guten) Datenblättern  
⇒ Eine geringe Reserve (< 25 %) ist technisch notwendig und in Hinblick auf den Wirkungsgrad unkritisch.
- Größere Überdimensionierungen sind zu vermeiden

### Drehzahlüberdimensionierung

- Netzbetrieb: Folgen können nur mit Getriebe oder andere Maßnahmen korrigiert werden, z. B. Gebläse mit Drossel  
⇒ zusätzliche Verluste
- Abhilfe mit Frequenzumrichtern



# Energieeffizienzklassen

EU-Richtlinien schreiben Energieeffizienzklassen vor:

<i>Klasse</i>	<i>Bezeichnung</i>
IE1	Standard Efficiency
IE2	High Efficiency
IE3	Premium Efficiency
IE4	Super Premium Efficiency

Abhängig von Leistungen, Polzahlen und Anwendung sind unterschiedliche Klassen und Einführungszeitpunkte vorgegeben.

## Beispiele für Polzahlen 2, 4, 6, 8

- 0,12...0,74 kW: seit 01.07.2021 IE2
- 0,75...1000 kW: seit 01.07.2021 IE3
- 75...200 kW: ab 01.07.2023 IE4

Wirkungsgrad in % (Auszug aus DIN EN 60034-30-1)					
P in kW	Klasse	Polzahlen			
		2	4	6	8
0,55	IE2	74,1	77,1	73,1	61,7
	IE3	77,8	80,8	77,2	73,0
	IE4	81,5	83,9	80,9	77,0
5,5	IE2	87,0	87,7	86,0	83,8
	IE3	89,2	89,6	88,0	86,2
	IE4	90,9	91,9	90,5	88,3
55	IE2	93,2	93,5	93,1	91,0
	IE3	94,3	94,6	94,1	92,5
	IE4	95,3	95,7	95,1	93,7

# Einsparpotential durch Energieeffizienzklassen

## Beispiel

Ein Motor (5,5 kW,  $p=4$ ) wird ganzjährig betrieben.

$$E_{IE2} = \frac{5,5 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h}}{0,877} = 54937 \text{ kWh}$$

$$E_{IE3} = \frac{5,5 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h}}{0,896} = 53772 \text{ kWh}$$

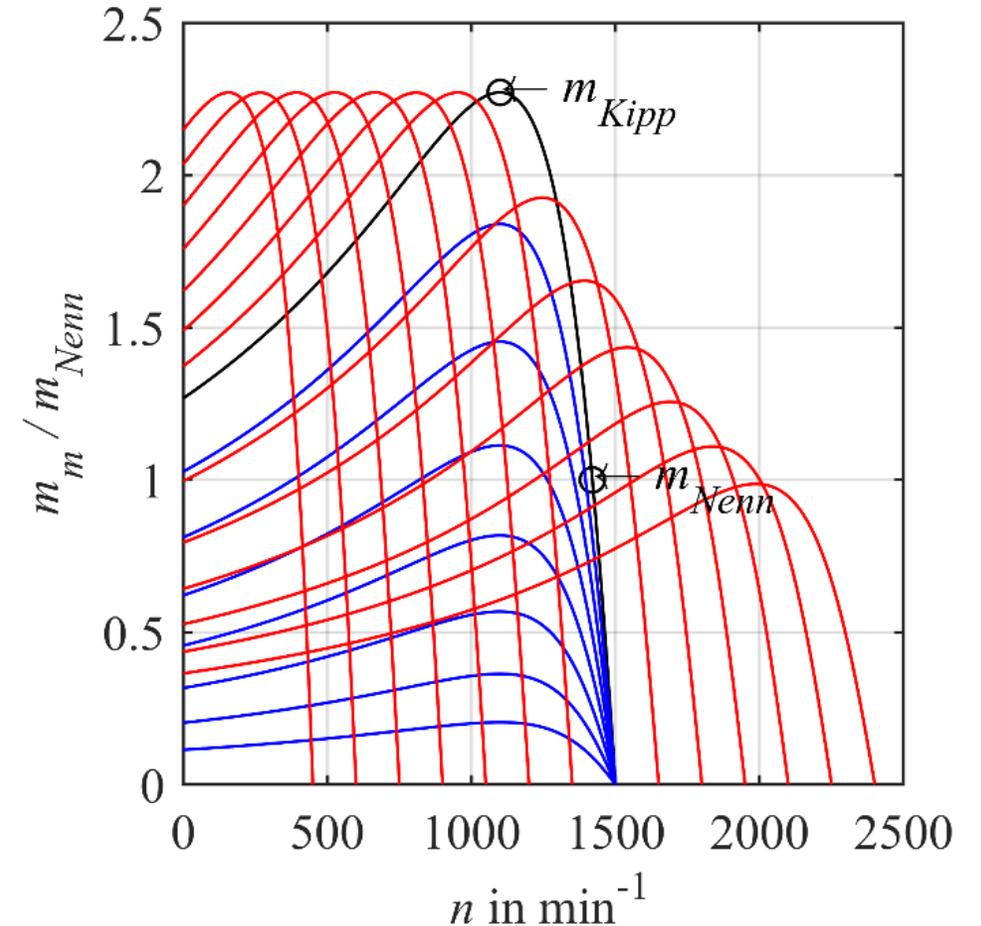
$$E_{IE4} = \frac{5,5 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h}}{0,917} = 52541 \text{ kWh}$$

Der um 4 % bessere Wirkungsgrad spart jährlich 2396 kWh ein!

Wirkungsgrad in % (Auszug aus DIN EN 60034-30-1)					
P in kW	Klasse	Polzahlen			
		2	4	6	8
0,55	IE2	74,1	77,1	73,1	61,7
	IE3	77,8	80,8	77,2	73,0
	IE4	81,5	83,9	80,9	77,0
5,5	IE2	87,0	87,7	86,0	83,8
	IE3	89,2	89,6	88,0	86,2
	IE4	90,9	91,9	90,5	88,3
55	IE2	93,2	93,5	93,1	91,0
	IE3	94,3	94,6	94,1	92,5
	IE4	95,3	95,7	95,1	93,7

# Frequenzumrichter

- I Frequenzumrichter speisen den Motor mit variabler Spannung *und* Frequenz
- I Die Drehmoment-Drehzahlkennlinien können beliebig eingestellt werden.  
 ⇒ Der Arbeitspunkt kann energetisch optimal eingestellt werden.
- I Ein Betrieb oberhalb der Bemessungsdrehzahl ist möglich.
- I Wird nur die Spannung variiert (z. B. Phasenanschnittsteuerung) kann die Drehzahl nicht beliebig eingestellt werden.



## Softstarter oder Frequenzumrichter?

### Softstarter

- speist den Motor mit variabler Spannung
- optimiert den Start am Netz  
(Einschaltstrom- und Drehmomentspitzen)
- ist im Dauerbetrieb unwirksam
- erlaubt keinen drehzahlvariablen Betrieb
- sehr preiswert
- sehr guter Wirkungsgrad

Softstarter sind nützlich um Asynchronmotoren anzufahren. Für die Energieeffizienz ist der Nutzen gering.

### Frequenzumrichter

- speist den Motor mit variabler Spannung *und* Frequenz
- erlaubt einen drehzahlvariablen Betrieb
- optimiert den Anlauf
- kann beliebige Arbeitspunkte einstellen
- preiswert
- guter Wirkungsgrad ( $\eta = 96 \dots 98 \%$ )
- erhöht die Verluste im Motor

Frequenzumrichter optimieren den Gesamtwirkungsgrad in vielen Arbeitspunkten.

# Getriebe

Nur in seltenen Fällen passt die Bewegungsform des Motors zu der Zielbewegungsform der Last  $\Rightarrow$  Einsatz eines Getriebes

## Beispiele

┃ Stirnradgetriebe, Planetengetriebe

$$\eta_G = 92 \dots 98 \%$$

┃ Schneckengetriebe

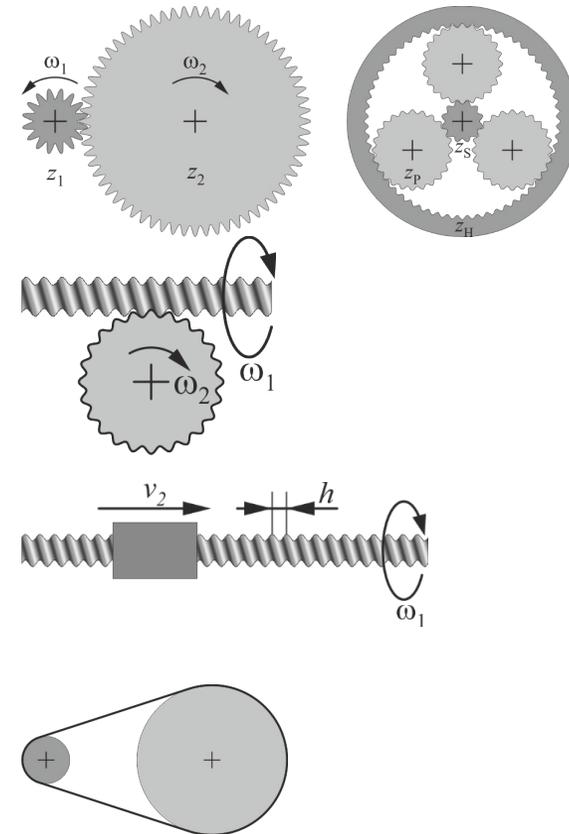
$$\eta_G = 30 \dots 90 \%$$

┃ Gewindespindel

$$\eta_G = 30 \dots 99 \%$$

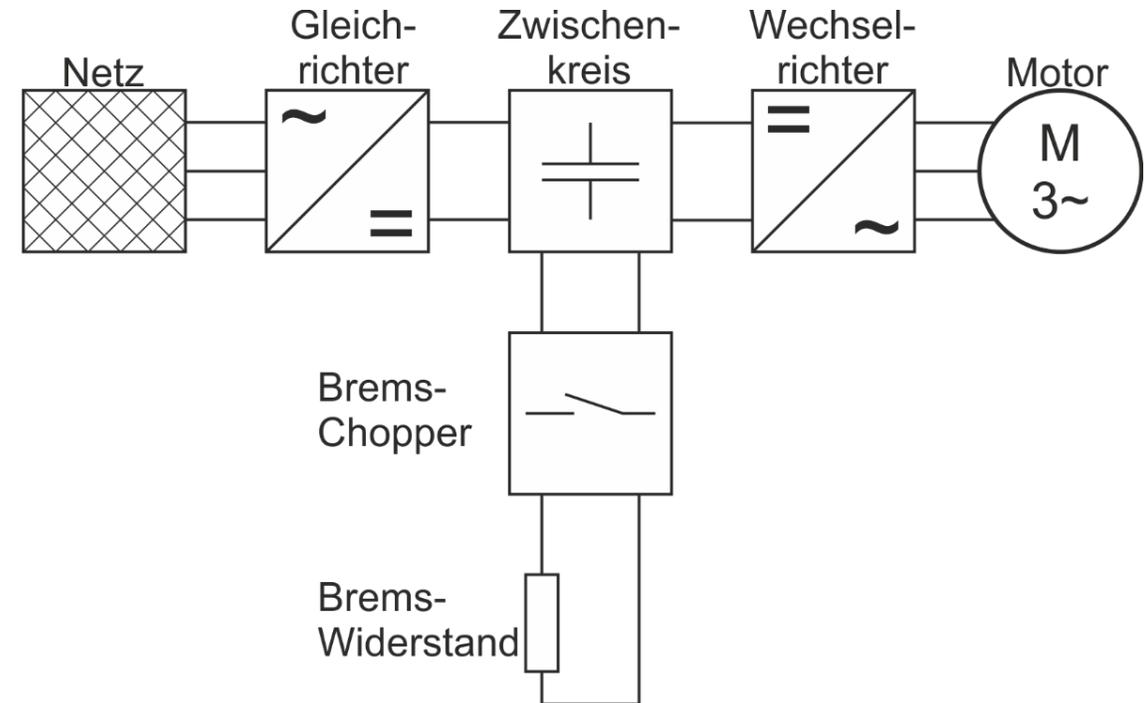
┃ Zugmittelgetriebe  
(Keilriemen, Zahnriemen, Ketten, ...)

$$\eta_G = 92 \dots 98 \%$$



## Verschwendung der Bremsenergie

- ! Beim generatorischen Bremsen gibt der Motor elektrische Energie ab.
- ! Mit einem Standard-VSD ist eine Nutzung nicht möglich
- ! Der Gleichrichter lässt eine Rückspeisung ins Netz nicht zu (unidirektionaler Leistungsfluss).
- ! Die Energie wird in einem Bremswiderstand „verheizt“.
- ! Mit zusätzlichen Komponenten kann diese Energie besser genutzt werden.

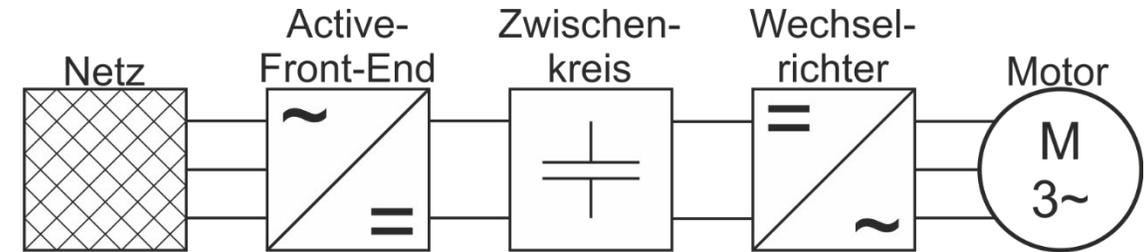


## Nutzung der Bremsenergie mit AFE

- Mit einem Active-Front-End (AFE, rückspeisefähiger Gleichrichter) kann die Energie ins Netz zurückgespeist werden.

### Probleme

- Kosten für Leistungselektronik, Drosselspulen und Netzfilter
- Gesamtwirkungsgrad?  
 Ggf. ist der Wirkungsgrad im Gleichrichtbetrieb schlechter als mit Standard.



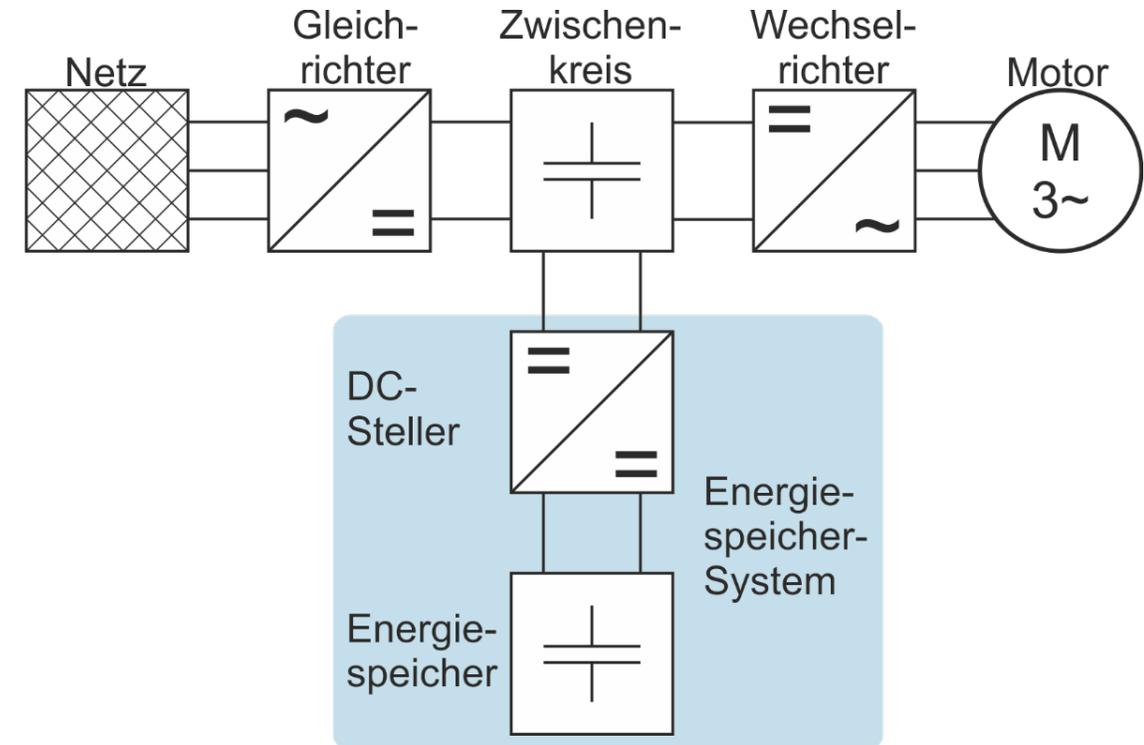
Die Sinnhaftigkeit hängt von der Applikation ab!

## Nutzung der Bremsenergie mit Energiespeicher

- ! Kurzzeitig anfallende geringere Bremsenergien können im Zwischenkreis gespeichert werden.
- ! Diese können für den nächsten Motorbetrieb genutzt werden.
- ! Mit Energiespeichersystemen kann die das Speichervermögen vergrößert werden.

### Eigenschaften

- ! Eignung für Einzelantriebe
- ! Nicht für lang andauernden Bremsbetrieb
- ! Zusätzliche Kosten
- ! Es gibt fertige Lösungen, z. B.:  
<https://bremsenergie.de/de/produkte/pxt>
- ! Ggf. Nachrüstung von Bestandsanlagen

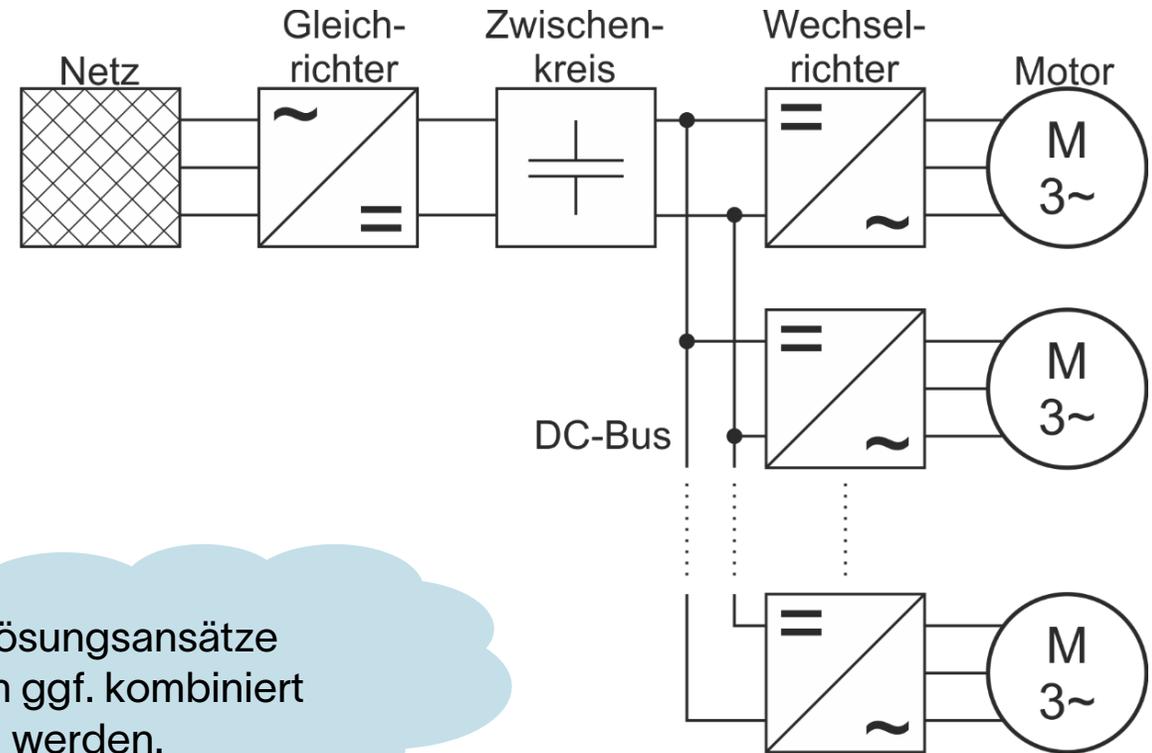


# Nutzung der Bremsenergie durch Zwischenkreiskopplung

Durch eine Zwischenkreis-Kopplung kann die Bremsenergie von Nachbargeräten genutzt werden.

## Eigenschaften

- Energieeffizient, keine unnötige Umformung
- Keine zusätzlichen Komponenten, geringe Kosten
- Schon lange verfügbar, aber oft proprietäre Lösungen  
(elektrische Sicherheit!)

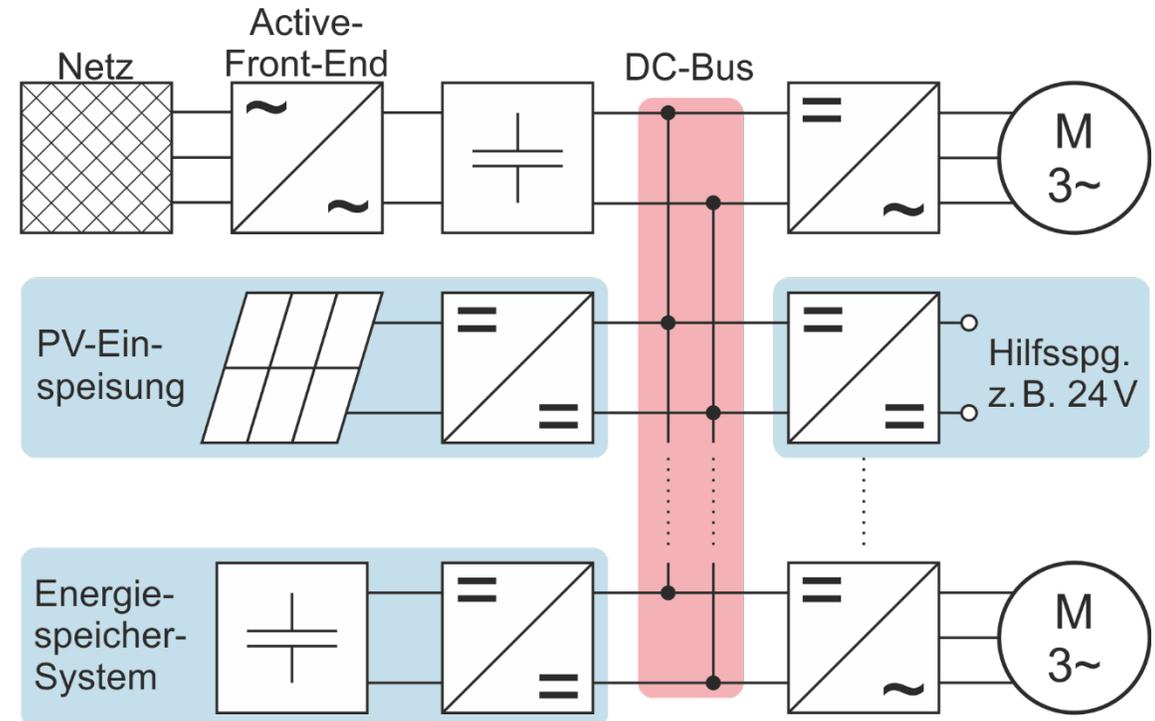


Die Lösungsansätze können ggf. kombiniert werden.

# DC-Industrie-Konzept

## Eigenschaften

- Viele Quellen, Verbraucher oder Speicher sind gut für DC-Netze geeignet.
- Diese lassen sich mit sehr guten Wirkungsgraden in das System integrieren.
- Aktuell erfolgt eine Standardisierung als offenes System:  
vgl.: <https://dc-industrie.zvei.org>



# Weiterführende Literatur

## *Inhalte des Vortrags in detaillierter Form*

- [1] ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V., Hg., „Energieeffizienz mit elektrischen Antrieben,“ 2017.

## *Energieeffizienzklassen*

- [2] *Drehende elektrische Maschinen: Wirkungsgrad-Klassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren*, DIN EN 60034-30-1 (VDE 0530-30-1): 2014-12, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

## *DC-Industrie-Konzept*

- [3] A. Sauer, Hg. *The DC-factory: Energy efficient. Robust. Forward-looking*. München: Hanser, 2021.  
[4] ZVEI und Konsortium DC-INDUSTRIE2, Hg., „Systemkonzept DC-INDUSTRIE2,“ Apr. 2022.

## *Analyse in der der Produktion*

- [5] HA Hessen Agentur GmbH, Hg., „Praxisleitfaden Energieeffizienz in der Produktion,“ Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Band 8, 2009. Zugriff am: 12. Juni 2023. [Online].  
Verfügbar unter: <https://upp-kassel.de/wp-content/uploads/2013/09/Praxisleitfaden-Energieeffizienz-in-der-Produktion.pdf>

## *Praxisbeispiel*

- [6] J. Albig, „Verfahren der Drehzahlveränderung von Ventilatoren in der Kältetechnik,“ *DIE KÄLTE & Klimatechnik*, Jg. 2007, Nr. 2, S. 46–51, 2007.